干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

新疆阿克苏河流域生态承载力监测及安全格局构建

杨振民，　刘新平

（新疆农业大学管理学院，新疆 乌鲁木齐　830052）

摘　要：阿克苏河流域作为西北干旱区内陆河，生态环境极为脆弱，研究其生态安全格局对优化区域国土空间开发保护格局，推动生产生活方式向绿色转型，促进人与自然和谐共生具有重要战略意义。基于研究区本底特征，运用空间主成分分析法（SPCA）对阿克苏河流域1980—2018年生态承载力时空演变进行评估监测，利用最小累积阻力（MCR）模型提取生态廊道及生态节点，构建生态安全格局。研究表明：（1）阿克苏河流域生态承载力空间差异明显，以中等承载为主，生态承载优势区呈现由中东部向西部转移趋势。（2）阿克苏河流域生态承载力呈增长趋势。近40 a阿克苏河流域整体生态承载力呈上升趋势，强承载区面积不断增加，弱承载区面积呈现波动下降趋势，表明流域环境有所改善。（3）生态源地占整体面积较少，分布较为集中。根据生态承载力评估结果，提取生态源地23465.21 km^2，约占研究区面积的35.61%。生态源地集中分布于流域中部地区，北部高山地区与西南部盆地、沙漠地区分布较少。（4）利用MCR模型及遥感影像，将阿克苏河流域划分为16个生态安全格局分区，提取生态廊道67条，识别生态节点71处，并结合生态承载力评估结果，对流域生态空间结构提出优化建议。

关 键 词：生态承载力；时空演变；生态安全格局；优化；阿克苏河流域

文章编号：

人口增加与经济发展使得生态承载压力持续加大，不可持续性矛盾日益凸显，影响着人与自然的和谐关系[1]。因此，有必要对区域环境的生态承载水平进行系统性的监测与评估，以缓解人与自然、人与社会之间的矛盾，进而维护区域生态安全，促进可持续发展。流域生态系统是一个集自然经济社会为一体的复杂生态系统，近年来，随着社会经济的持续发展，多重风险源在流域内相互叠加，使得流域生态环境受到越来越多的外部威胁，面临较大的生态安全压力[2]。为了确保一定流域范围内生态系统的正常运行，实现区域的全面稳定协调发展，对阿克苏河流域生态承载力进行监测和预警研究具有十分重要的意义。

阿克苏河流域作为西北干旱区内陆河，对维持区域生态环境稳定、生物多样性及社会可持续发展具有重要价值。近些年随着数据的易获取性及研究方法的改进，已有学者对阿克苏河流域生态承载力及生态安全进行了研究。魏光辉等[3]从社会经济、生态环境、水土资源等方面选取指标，对阿克苏河流域环境承载力进行了研究；张旭等[4]对阿克苏河水资源承载限度进行研究；艾克旦·依萨克等[5]通过压力-状态-响应（PSR）模型对阿克苏河流域绿洲生态安全进行了研究；柏玲等[6-8]对阿克苏河流域气候变化对径流影响、流域土壤侵蚀、洪水演变特征等方面进行分析研究；段峥嵘等[9-12]对阿克苏河流域绿洲耗水特征、干旱预警、绿洲适宜规模进行分析研究。以上研究成果对维护区域生态安全与可持续发展提供了重要的理论支撑。然而上述研究缺乏针对阿克苏河流域生态承载力测算及安全格局构建的系统研究，且往往集中于近20 a，而对1980—2020年的流域内生态承载力及生态安全趋势及特征研究较少，因此有必要进行补充和完善。

收稿日期：2020-08-18；　**修订日期：**2021-04-12

基金项目：新疆农业大学研究生科研创新项目（XJAUGRI2019031）；国家自然科学基金（71663051）

作者简介：杨振民（1997-），男，硕士研究生，主要从事土地利用与土地生态研究. E-mail: yangzhenmin12@163.com

通讯作者：刘新平（1959-），男，教授，主要从事土地利用与土地生态研究. E-mail: lxping16@163.com

本文以阿克苏河流域为研究区域,选取1980—2018年5期遥感影像及流域气象、水文、社会经济等统计数据,分析流域内生态承载力的时空变化特征及影响因素,利用最小累积阻力(MCR)模型识别生态廊道、辐射道及生态节点,进而构建出更为合理的阿克苏河流域生态安全格局,以期为流域资源环境绿色可持续发展提供科学参考。

1 研究区概况

阿克苏河流域位于天山以南,塔里木盆地以西,地理范围介于75°23′~81°34′E,37°55′~42°34′N之间。流域内包含托什干河、库玛拉克河两大支流,总面积约为7.04×10⁴ km²。整个流域地势北高南低、西高东低。阿克苏河流域流经克孜勒苏柯尔克孜自治州阿合奇县,阿克苏地区的温宿县、阿瓦提县、乌什县、阿克苏市以及新疆生产建设兵团第一师阿拉尔市,尾端同叶尔羌河、和田河在肖夹克处汇入塔里木河(图1)。

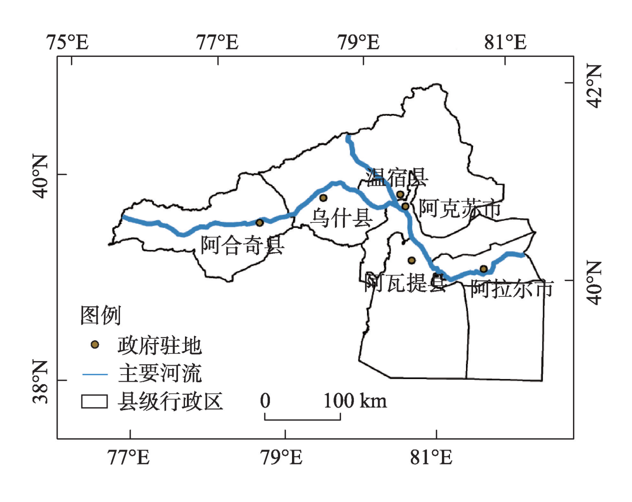


图1 研究区示意图

Fig. 1 Overview of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文的研究数据包括数字高程模型(DEM)、归一化植被指数(NDVI)等空间数据以及气象、水文、社会经济等统计数据。DEM数据来自地理空间数据云平台SRTM地形产品V4.1版数据。NDVI数据来源于NASA网站发布的MODIS产品,空间分辨率1 km×1 km。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网提供的1980、2000、2006、2012、2018年阿克苏河流域6个站点(乌什站、阿克苏站、阿瓦提站、阿拉尔站、柯坪站、沙雅站)逐月观测的降水、温度、湿度数据。阿克苏河流域土壤侵蚀数据、1 km×1 km土地利用数据(1980、2000、2006、2012、2018年)从中国科学院资源环境科学与数据中心获取。土壤有机质数据来源于中国土壤数据库第二次土壤普查农田肥力数据库。社会经济统计数据来源于《新疆统计年鉴》《新疆兵团第一师阿拉尔市统计年鉴》。

2.2 指标构建与数据处理

将生态承载力作为评价目标层,选取生态弹性力[13]、资源与环境承载力[14]、人类社会影响压力[15]3个指标作为准则层(表1)。其中土地退化指数、生物丰度指数、水网密度指数的获取过程参考张学渊等[13]、高吉喜等[16]的研究。年降水量利用站点数据进行空间插值获取。地形位指数与温湿指数分别参考杨斌等[17]、施国萍等[18]的研究。由于各指标单位不统一,不能直接进行比较,因此运用Min-Max法对各指标进行标准化处理,正向指标与生态承载力呈正相关,负向指标则呈负相关。其公式为:

正向指标:

$$R_i + (X_i - X_{min})/(X_{max} - X_{min}) \quad (1)$$

负向指标:

$$R_i + (X_{max} - X_i)/(X_{max} - X_{min}) \quad (2)$$

式中:R_i为第i个指标的标准化值;X_i为各指标的原始值;X_{max}、X_{min}为各指标的最大值和最小值。

2.3 空间主成分分析

空间主成分分析(SPCA)是将指标原始数据进行降维处理后,选出明显具有优势的几个主成分,以此来概括整体状况的研究方法。整个过程避免人为干扰,因此评价结果具有一定的客观和科学性。利用专业软件,进行空间主成分分析,计算出研究区不同年份总的生态承载力值,公式[19]为:

$$ECC = r_1Y_1 + r_2Y_2 + r_3Y_3 + \cdots + r_nY_n \quad (3)$$

式中:ECC为该地区的总生态承载力值;r_i为第i个主成分;Y_i为第i个主成分的贡献率,由公式(3)得出阿克苏河流域总生态承载力值。

$$ECC_{1980} = 0.4417 \times P1 + 0.2608 \times P2 + 0.1826 \times P3 + 0.0728 \times P4 \quad (4)$$

$$ECC_{2000} = 0.3851 \times P1 + 0.2647 \times P2 + 0.1691 \times P3 + 0.1035 \times P4 \quad (5)$$

表1　阿克苏河流域生态承载力评价指标体系

Tab. 1　Evaluation index system of ecological carrying capacity in the Aksu River Basin

目标层	准则层	指标层
生态承载力	生态弹性力	温湿指数(+)、归一化植被指数(+)、土地退化指数(-)、土壤有机质含量(+)、生物丰度指数(+)、水网密度指数(+)、年降水量(+)、地形位指数(+)
	资源与环境承载力	第三产业占GDP比重(+)、人均耕地面积(+)、人均林地面积(+)
	人类社会影响压力	人口密度(-)、经济密度(-)、城市化水平(+)、GDP增长率(-)、土地垦殖率(-)、工业二氧化硫排放量(-)

注:"+"代表正向指标;"-"代表负向指标。

$$ECC_{2006} = 0.4521 \times P1 + 0.2304 \times P2 + 0.1840 \times P3 + 0.1014 \times P4 \quad (6)$$

$$ECC_{2012} = 0.4931 \times P1 + 0.2513 \times P2 + 0.1401 \times P3 + 0.0992 \times P4 \quad (7)$$

$$ECC_{2018} = 0.4166 \times P1 + 0.2832 \times P2 + 0.1770 \times P3 + 0.0959 \times P4 \quad (8)$$

式中：ECC_{1980}、ECC_{2000}、ECC_{2006}、ECC_{2012}、ECC_{2018}分别为1980、2000、2006、2012、2018年的总生态承载力值；$P1 \sim P4$是原始数据进行减少维数、浓缩信息后，累积贡献率超过85%的前4个主成分因子[20]。为便于ECC的比较，对ECC进行标准化处理，其公式为：

$$SI_{ECC} = \frac{ECC_i - ECC_{min}}{ECC_{max} - ECC_{min}} \quad (9)$$

式中：SI_{ECC}为总生态承载力的标准化值，值域为0~1；ECC_i为总生态承载力的实际值；ECC_{max}、ECC_{min}为总生态承载力的最大值与最小值。

2.4　生态安全格局构建

以俞孔坚等[21]构建生态安全格局的思想为基础，结合阿克苏河流域生态承载力结果及地域特征，识别生态源地。利用最小累积阻力(Minimum cumulative resistance, MCR)模型

识别生态廊道、辐射道及生态节点，进而构建生态安全格局。其公式为：

$$MCR = f_{min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (10)$$

式中：MCR为最小累积阻力值；R_i为第i个单元对某运动的阻力系数；D_{ij}为物种从第j个单元到第i个单元的运动距离；f_{min}为正相关函数，反映了栅格单元对于某运动的最小累积阻力值。

2.4.1　*生态源地的确定*　生态源地是一定范围内生态服务价值较高的区域，是调节区域生态系统的重要生态资源。本文将上述5个年份的生态承载力计算结果进行标准化处理后，选取前20%的区域作为优先保护区，将其与流域内主要的湖泊、河流、林地斑块取并集到总的生态源地[13]。

2.4.2　*最小累积阻力面构建*　为反映生态源地间物质能量流动的态势，本文运用MCR模型计算生态源地到不同景观类型的难易程度。根据研究区特性，选取坡度、NDVI、景观类型、土壤类型、高程6个方面建立阻力评价体系(表2)，并将每个指标划分为5个等级并分别赋值1~5。赋值越小，说明源地间能量或物质流动的阻力较小，生态系统越完整，生态承载力越强；赋值越大，说明物质或能量流动的阻力较大，影响着区域生态系统服务价值能效，因此生态承载力越弱。为使生态安全格局分区更加科学，本文将三生用地与累积耗费路径等级面相叠加，从而使生态安全格局的构建更具科学性，计算公式[13,22]为：

$$ESP = 10 \times Code_{ARD} + Code_{AGL} \quad (11)$$

表2　生态阻力因子等级划分表

Tab. 2　Classification of ecological resistance factors

生态阻力等级	1	2	3	4	5
坡度/(°)	>40	20~40	13~20	8~13	<8
高程/m	>4300	3000~4300	1700~3000	720~1700	<720
景观类型	水域	林地	草地	耕地	建设用地、未利用地
土壤类型	水稻土、潜育水稻土、黑钙土	林灌草甸土、灰褐土	草甸土、草甸盐土	风沙土、灌淤土、潮土	棕漠土、盐化棕漠土、漠境盐土
NDVI	>0.5	0.3~0.5	0.15~0.3	0~0.15	<0

式中:ESP是生态安全分区代码;$Code_{ARD}$为1~4级累积耗费距离表面等级代码,其中1~4分别代表生态保育区、优化缓冲区、生态过渡区、生态防护区。$Code_{AGL}$为4种地类代码,其中0~3分别代表未利用地、生产用地、生态用地、生活用地。计算出的ESP中十位数代表累积耗费路径等级代码,个位数为4种地类代码,例如43代表生态防护区生活用地。

2.4.3 生态廊道、辐射道及生态节点的确定 利用水文分析工具[23],以累积耗费阻力面为基础,经过确定水流方向、洼地填平等步骤,最后通过反复测定后选择阈值大于100的值,获得源地间物质能量流动的最小累积阻力路径,对其矢量化后,剔除部分重复路径后输出一条平滑的曲线,即为生态廊道。此外,基于累积耗费距离表面识别出的辐射道能够增强生态源地向外扩散的能力,提高源地之间的连接度,因此也有必要识别和提取。生态节点一般分布在阻力最小路径交界处或最大路径与最小路径相交处,是生态系统中较脆弱、易受干扰的点,保护和修复这些节点,对维持区域生态系统整体性、连通性具有重要战略价值。

3 结果与分析

3.1 生态承载力总体特征

运用SPCA测算阿克苏河流域不同时期生态承载力值,利用自然间断法将计算结果划分为4个等级:弱承载(0~0.33)、中等承载(0.33~0.50)、较强承载(0.50~0.68)、强承载(0.68~0.10)(图2)。整体上看,流域生态承载力以中等承载为主,强承载区主要位于流域中部,沿河呈"之"字型分布,弱承载区主要分布于塔克拉玛干沙漠西北边缘、塔里木盆地以及天山南脉地区。从县域上看,阿合奇县、温宿县、乌什县、阿瓦提县大体呈上升趋势,阿拉尔市呈下降趋势,乌什县基本不变。

由阿克苏河流域不同年份生态承载力面积变化图(图3)可以看出,近40 a流域生态承载力呈上升趋势,强承载区面积不断增加,弱承载区面积呈现波动下降趋势,表明流域环境有所改善。分时段看,1980年,流域生态承载力显著恶化,这主要因为改革开放后,全国逐渐步入以经济建设为中心的时代发展中,发展更注重经济效益,忽视生态效益,加之人们长期以来对流域自然资源,特别是水资源的不合理利用,使得沿河绿洲急剧萎缩,荒漠化面积迅速扩张,生态环境严重退化。2000年,生态承载水平有一定的改善,但弱承载区仍占有较大比重。一方面得益于塔里木河流域综合治理,流域生态环境得到一定的改善,另一方面受西部大开发战略实施的影响,工业规模不断扩大,矿产资源的发掘不可避免毁坏周围森林植被,导致植被覆盖率下降。

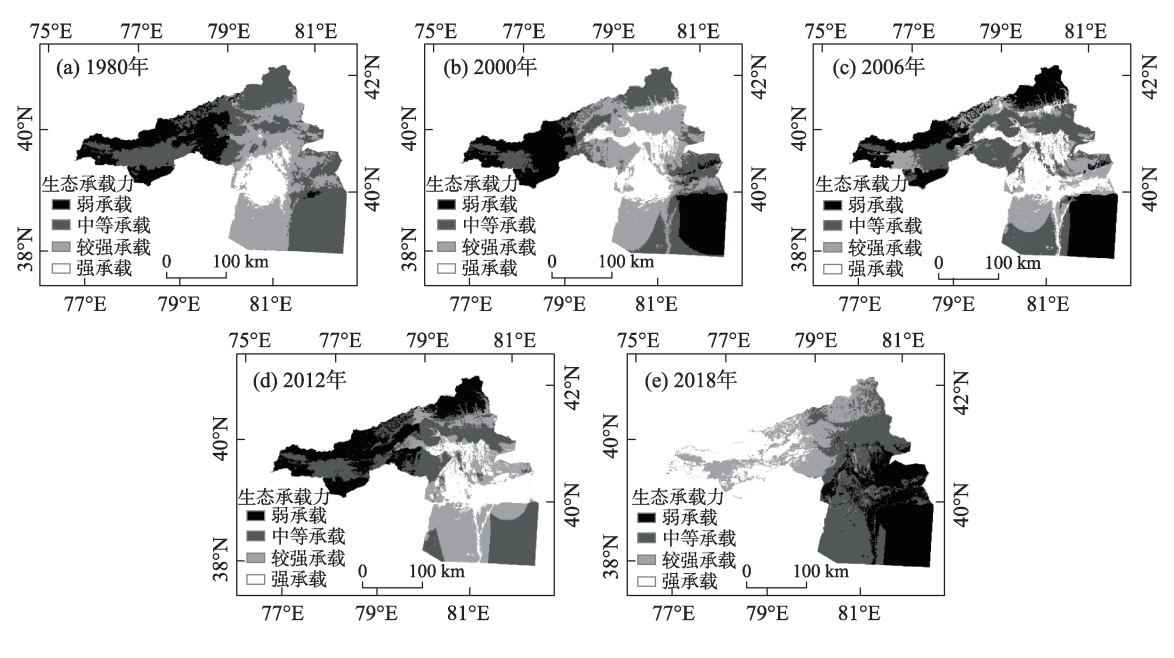


图2 1980—2018年阿克苏河流域生态承载力时空变化

Fig. 2 Spatiotemporal changes of the ecological carrying capacity in the Aksu River Basin from 1980 to 2018

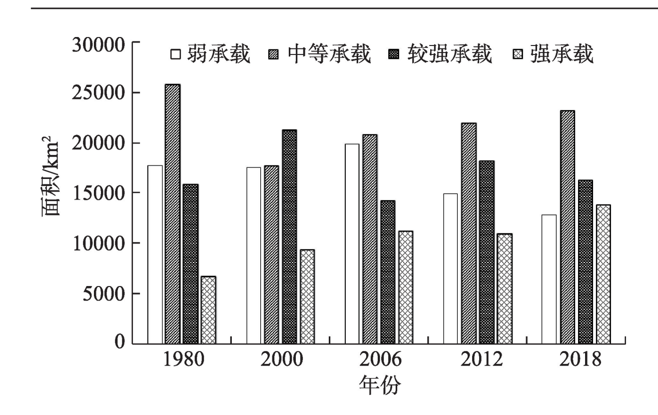


图3 1980—2018年阿克苏河流域不同年份生态承载力面积变化

Fig. 3 Change of ecological carrying capacity area in the Aksu River Basin in different years from 1980 to 2018

同时，城市化扩张与工业污染速度不断加快，使得流域生态承载水平仍以弱承载和中等承载为主。2006年，流域生态承载力呈轻度恶化，弱承载力和中等承载力面积分别上升了2326 km²和3072 km²，较强承载区面积下降了7019 km²。这主要是因为2006年为“十一五”规划的开局之年，为了有一个良好开局，阿克苏地区大力推进工业化进程，随着工业规模的扩大，原油、原煤等矿产资源的开采，不可避免地毁坏周围地貌，使得植被覆盖率下降，加重了流域生态环境的压力，生态承载能力下降。2012年，生态承载力有一定的改善，弱承载区面积下降，中等和较强承载区面积上升，强承载区面积变化不大。这得益于国家环境保护“十五”计划、塔河流域综合治理工程等一系列重大决策的落地，并加强生态文明建设，使得各地区各部门更加重视区域生态环境的治理与保护。2018年，流域生态承载力状况得到进一步的改善，弱承载区面积减少了2139 km²，降至12817 km²，强承载区面积增加了3943 km²，升至13773 km²，这得益于阿克苏河流域产业结构不断优化提升，环境治理投资不断增加以及人与自然命运共同体意识的增强，使得环境质量有所提高。

3.2 生态安全格局的构建与优化

3.2.1 *生态源地识别* 通过对阿克苏河流域生态承载力评估，将5个年份的生态承载力计算结果标准化处理后，选取前20%的区域作为优先保护区（图4a~e）。将所有的优先保护区与流域内主要的湖泊、河流以及林地斑块取并集得到最终的生态源地（4f），面积为23465.21 km²，约占全区面积的35.61%。整体上看，生态源地占整体面积较少，分布较为集中。生态源地集中分布于流域中部地区，中部地区是托什干河、库玛拉克河两大支流交汇处，地势平坦、河网密集、沿岸绿洲较多，生态质量较高，而西北部高山地区与西南部盆地、沙漠地区受气候和地形的影响，生态源地分布较少。

3.2.2 *生态功能分区* 以5期累积耗费距离表面为基础，利用自然断点法将研究区划分为4级生态安

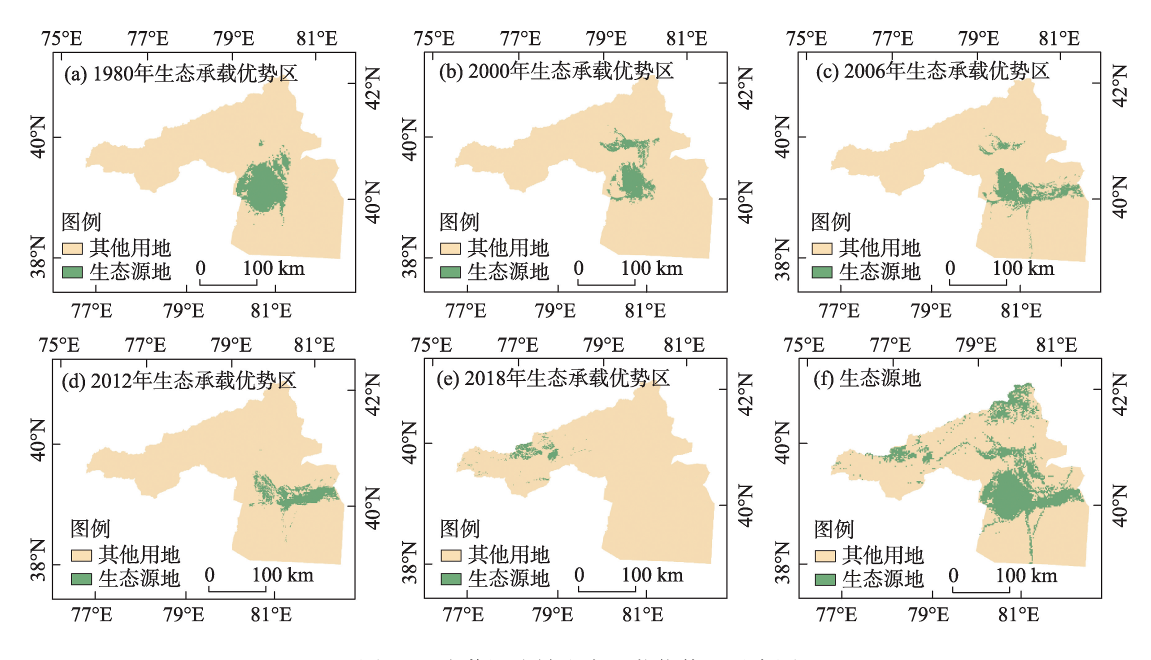
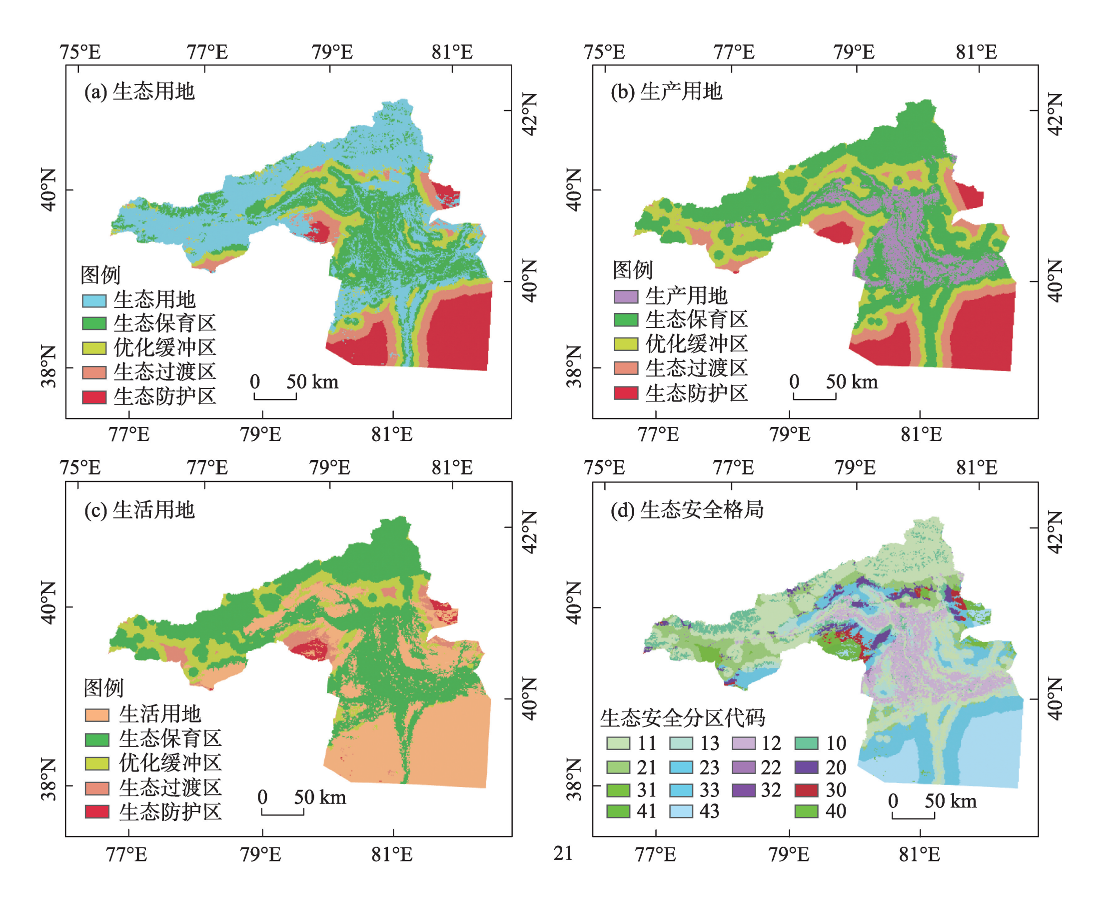


图4 阿克苏河流域生态承载优势区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of ecological carrying advantage area in the Aksu River Basin

全格局分区，即生态保育区、优化缓冲区、生态过渡区、生态防护区。为使生态安全格局分区更加科学合理，本文利用2018年阿克苏河流域土地利用遥感数据提取出三生用地（图5a~c），将其与累积耗费距离表面叠加，得到最终的生态安全格局分区（图5d）。其中生产用地是指进行生产与供给的经营性场所，以水田、旱地、工业用地为主；生活用地是指承载和保障人居功能的区域，以城镇用地、农村居民点用地为主；生态用地是指调节和维护生态功能以及提供生态服务的区域，以湿地、林地、水域为主[24]。

根据公式（10）获取生态功能格局分区图（图5d），并对其进行统计分析（表3）。其中，11为流域内核心的生态斑块，面积占比最大，为33.33%。其主要分布于天山南麓地区与河流的流经区，生态服务价值量巨大，应因地制宜建立保护区进行永久性保护，以期得到永续利用。22、43、23主要分布于塔里木盆地的西北边缘绿洲区，该区域人类活动较频繁，对周围环境影响巨大，因此该区域应划定合理的生产生活边界，防止盲目扩张土地而引发生态危机。33、12、13靠近河流，且沿岸分布着大片耕地，应在河流与耕地交界处种植树木以防止水土流失，合理利用流域水资源进行灌溉，逐步推广利用有机肥从而减轻河流的污染和富营养化。41、21、31、32分布着大片天然草场，畜牧业的发展使得草场面积出现退化趋势，因此应严格控制放牧数量，科学合理设置草场围栏、休牧等措施保障草场能够休养生息。30、40主要分布于塔克拉玛干沙漠的西北边缘，地表植被较少，生境质量较差，为了防止风沙的进一步扩展，应在该区域种植防护林，逐渐恢复地表植被，从而使生态屏障更加牢固。10主要位于高大山脉的顶部，受风蚀影响，山顶岩石破碎，植被较少，因此该区域应采用技术或生物工程，建立生态廊道，增加景观的连通性。20主要位于山脉与绿洲的交界处，应防止人类逐渐扩大种植面积，提高绿洲资源的利用效率，并在绿洲与山脉交界处设置隔离带，守住生态安全边界。



注：生态安全分区代码中，十位数1~4分别代表生态保育区、优化缓冲区、生态过渡区、生态防护区，个位数0~3分别代表未利用地、生产用地、生态用地、生活用地。

图5 不同累积耗费距离表面的三生用地叠加图

Fig. 5 Different cumulative distances from the surface of the production-living-ecological land superposition

表3 生态安全格局分区统计

Tab. 3 Regional statistics of ecological security pattern

代码	生态安全格局分区	面积/km²	百分比/%	主要分布区域
11	生态保育区生态用地	23469	33.327	天山中段南麓西部保护区、天山南脉保护区、和田河流域、叶尔羌河流域、阿克苏河流域、乌什谷地保护区
43	生态防护区生活用地	8841	12.554	塔里木盆地西北边缘绿洲区
12	生态保育区生产用地	7542	10.710	山前洪积-冲积平原、中、低山丘陵的天然草场
13	生态保育区生活用地	5983	8.496	山前洪积-冲积平原、中、低山丘陵的天然草场
21	优化缓冲区生态用地	5875	8.343	以草地为主、主要山脉的草甸区
23	优化缓冲区生活用地	5598	7.949	优化缓冲区生产用地
33	生态过渡区生活用地	4446	6.313	托什干河流域、叶尔羌河流域、和田河流域
10	生态保育区未利用地	3321	4.716	高大山脉顶部、绿洲区
20	优化缓冲区未利用地	1945	2.762	高大山脉顶部、绿洲边缘区
31	生态过渡区生态用地	1354	1.923	托什干河南部边缘绿洲区，主要以草地为主
30	生态过渡区未利用地	871	1.237	戈壁、沙漠区
40	生态防护区未利用地	573	0.814	戈壁、沙漠区
41	生态防护区生态用地	424	0.602	塔克拉玛干沙漠西北边缘绿洲区，以草地为主
22	优化缓冲区生产用地	171	0.243	山麓砾质扇形地、冲积平原区
32	生态过渡区生产用地	8	0.011	托什干河流域、叶尔羌河流域、和田河流域
42	生态防护区生产用地	0	0.000	

3.2.3 生态廊道提取和优化 利用水文分析工具提取研究区生态廊道67条、辐射道171条(图6)，总长度为4203.04 km。从空间上看，生态廊道围绕河流分布，且集中分布于中部和东部，西部较少。这主要是因为中部和东部地区河网较密集，林地、耕地、园地数量较多，生境质量优越，而西部地区海拔较高，河网稀少，生物多样性较差，生态环境较为脆弱，廊道分布较少。除了“源地”间的生态廊道，以某一“源地”为中心向外扩散的辐射道对维持生态系统稳定起重要作用，因此，通过识别辐射道，增加物种向外扩散和交流通道，从而更有效地提升整个网络的生态功能。将识别出的生态廊道、辐射道细分为绿色生态廊道、道路型廊道和河流型廊道。其中，绿色生态廊道是“源地”间物质能量流动最天然的路径，是构建生态安全格局的基础。因此应将重要生态源地建立保护区，进行永久保护，严禁在保护区内进行开发建设，维护源地间的稳定性和连通性。河流型廊道是物质流动阻力消耗较少的路径，是构建生态安全格局的关键。选取阿克苏河流域等作为河流型廊道重点建设区，以河流为中心，向外建立缓冲区，并严格控制耕地向河流附近蔓延，合理引水灌溉，从而推动绿色发展，促进人与自然的和谐共生。道路型廊道也是增强生态斑块间物质流动的重要途径。选取研究区内的南疆铁路、伊阿(伊宁—阿克苏)铁路，S219、S209、S309等省道，G219、G217、G580等国道作为道路型廊道建设的重点，通过拓展廊道宽度以促进廊道功能的发挥，从而维系区域生态环境的平衡发展。

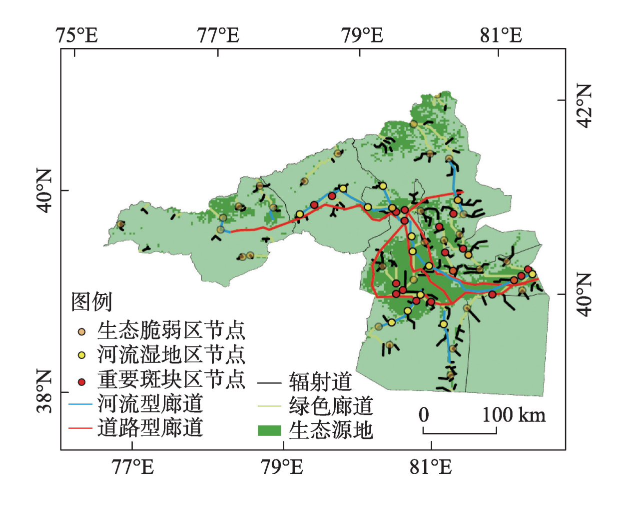


图6 生态廊道、节点格局优化图

Fig. 6 Optimization diagram of ecological corridor and node pattern

3.2.4 识别潜在生态节点 依据研究区的自然地理特征，共识别出生态节点71处。其中20处位于生态源地之间，16处位于河流流经区，35处位于山地或山麓地区。将上述3类节点依次划分为：生态脆

弱区节点、重要斑块区节点和河流湿地区节点(图6)。其中,生态脆弱区节点数量较多,主要位于最小累积阻力路径和最大消耗路径的交汇处或最大耗费路径的交汇处,是物种的迁移与生态流扩散的重要踏板,生态环境非常脆弱,应在这些区域设立禁止建设区,从而维护流域内稀缺的生态资源;重要斑块区节点主要分布于生态廊道交叉处,物质能量流通性较大。近年来,城镇建设不可避免的破坏周围的地貌环境,出现林草地面积减少、湖泊萎缩等环境问题,严重影响着人类生产生活的质量及社会的可持续发展。因此需要制定科学合理的城市发展规划,严格控制城市扩张边界,减少生活和生产污染,合理退耕还林还草,维护区域生态系统的稳定性,守住自然生态安全边界。河流是物质能量流动阻力较小的路径,承担着干旱区最重要的生态水源涵养和荒漠化防治的重大责任,因此,未来应重视对河流湿地的修复治理,关停高耗水性产业,创新农业灌溉方式,并定期向湖泊内输水以维持河流整体的生态环境。

4 讨 论

(1) 生态承载力评价为区域发展提供底线约束

本文从生态弹性力、资源环境承载力、人类社会影响压力等方面系统分析了阿克苏河流域生态承载力状况,并利用空间主成分分析法对生态承载力进行监测、评估,是对西北干旱区内陆河生态承载力测算的一次有益尝试。区别于以往研究主要集中于阿克苏河流域的水资源承载限度[4]、流域径流变化[6]及干旱预警[11]等方面,本文依靠研究区较长的时间跨度,同时考虑了生态资源环境对生态承载力的影响及人类社会对生态承载力的影响,较为科学的测算了阿克苏河流域生态承载力水平,依据测算结果构建了流域生态安全格局,明确了流域开发与保护的关系,为区域生态环境的保护和修复,以及促进区域内资源的合理循环提供重要参考。

(2) 生态承载力强弱反映社会发展对生态系统的影响程度

研究发现流域生态承载能力呈增加趋势,表明流域内生态环境有所改善,研究结果与魏光辉等[3]研究基本一致。近40 a,阿克苏河流域空间上生态承载强弱区呈现交替变化特征,即原始的生态脆弱区经过持续的环境整治,使生态承载力不断提升,而原本生态承载力较好的地区,因为过度的经济利用,使生态承载限度不断降低,最后出现环境危机,这时政府又会重新重视这些环境问题,继续投入治理资源,而放松了对原本已治理较好区域的管理,从而出现一种"环境好-开发利用-环境污染-环境治理-环境好"循环模式,浪费资源,因此在维持现有沿河生态优势的基础上,统筹上、中、下游生态治理,是实现流域生态总体水平提升的关键所在。

(3) 区域生态安全格局的构建是实现人与自然和谐依存必然举措

通过构建生态安全格局,对优化区域国土空间开发保护格局,推动生产生活方式向绿色转型,促进人与自然和谐共生具有重要战略意义。本文在对该区域进行生态承载力评价时,不仅考虑到区域的自然环境方面,也考虑到了社会经济方面,在格局优化中不仅考虑到了河流、林地这些自然生态廊道,也考虑到铁路、公路等人工建设的廊道,使得生态安全格局网络结构更科学和全面。本文尝试对识别出的生态廊道及生态节点提出优化建议,但研究尚浅,因此,如何更科学布局生态节点及识别生态廊道是下一步的研究方向。本文在选取指标对研究区生态承载力评价时,指标的选取带有一定的主观性,使得研究结果可能存在一定的误差,今后应对指标选取及对相关数据的修正需要进一步完善。

5 结 论

本文运用空间主成分分析法(SPCA)对阿克苏河流域1980—2018年生态承载力的时空演变进行评估监测,利用最小累积阻力(MCR)模型提取生态廊道及生态节点,构建生态安全格局,得到以下结论:

(1) 流域生态承载力空间差异显著。阿克苏河流域生态承载力以中等承载为主,生态承载优势区呈现由中东部向西部转移的趋势。强承载区主要位于流域中部,沿河呈"之"字型分布,弱承载区主要分布于塔克拉玛干沙漠西北边缘、塔里木盆地以及天山南脉地区。

(2) 流域生态承载力呈增长趋势。近40 a阿克苏河流域整体生态承载力呈上升趋势,强承载区面积不断增加,弱承载区面积呈现波动下降趋势,表

明流域环境有所改善。从县域看，阿合奇县、温宿县、乌什县、阿克苏市呈上升趋势，阿拉尔市呈下降趋势，阿瓦提县基本不变。

（3）生态源地占整体面积较少，分布较为集中。通过对阿克苏河流域生态承载力评估，提取出生态源地23465.21 km^2，约占研究区面积的35.61%，生态源地集中分布于流域中部地区，北部高山地区与西南部盆地、沙漠地区分布较少。

（4）利用MCR模型及遥感影像，将阿克苏河流域划分为16个生态安全格局分区，提取流域生态廊道67条，生态廊道主要沿河流分布，且集中分布于中部和东部，西部较少。识别出生态节点71处，其中20处位于生态源地之间，16处位于河流流经区，35处位于山地或山麓地区，未来仍需加强对核心生态源地的保护，合理构建生态廊道，修复生态脆弱点，从而促进区域生态-社会-经济的和谐发展。

参考文献（References）

[1] 乌宁巴特, 刘新平, 马相平. 叶尔羌河流域土地生态脆弱性差异评价[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 849-858. [Wuningbart, Liu Xinping, Ma Xiangping. Evaluation on the difference of land ecological vulnerability in the Yarkant River Basin[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 849-858.]

[2] 张学斌, 石培基, 罗君, 等. 基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析——以石羊河流域为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 410-419. [Zhang Xuebin, Shi Peiji, Luo Jun, et al. The ecological risk assessment of arid inland river basin at the landscape scale: A case study on Shiyang River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 410-419.]

[3] 魏光辉, 姜振盈, 张洛晨. 基于模糊综合评价的新疆阿克苏河流域环境承载力研究[J]. 浙江水利水电学院学报, 2018, 30(3): 30-34. [Wei Guanghui, Jiang Zhenying, Zhang Luochen. Assessment of water environmental carrying capacity in Akesu River Basin based on fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2018, 30(3): 30-34.]

[4] 张旭, 刘新华, 张桂林, 等. 新疆阿克苏河流域水资源承载力变化分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 44-47. [Zhang Xu, Liu Xinhua, Zhang Guilin, et al. Analysis of change of water resources carrying capacity in the Aksu River Basin in Xinjiang[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(9): 44-47.]

[5] 艾克旦·依萨克, 满苏尔·沙比提, 阿曼妮萨·库尔班, 等. 阿克苏河流域绿洲生态安全评价及影响因子分析[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(7): 217-223. [Essak Akidan, Sabit Mansur, Kurban Amannisa, et al. Ecological security evaluation and impact factor analysis of oasis in Aksu River Basin[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(7): 217-223.]

[6] 柏玲, 陈忠升, 王充, 等. 西北干旱区阿克苏河径流对气候波动的多尺度响应[J]. 地理科学, 2017, 37(5): 799-806. [Bai Ling, Chen Zhongsheng, Wang Chong, et al. Multi-scale response of runoff to climate change in the Aksu River Basin in arid area of the northwestern China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(5): 799-806.]

[7] 孙晓雷. 基于RS和GIS的阿克苏河流域土壤侵蚀研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(增刊1): 418-421. [Sun Xiaolei. Study on soil erosion of Aksu River Basin based on RS and GIS[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(Suppl.1): 418-421.]

[8] 蒋军新, 蔡明, 徐永军, 等. 新疆阿克苏河流域洪水演变趋势研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 1-10. [Jiang Junxin, Cai Ming, Xu Yongjun, et al. The changing nature of flooding in the Aksu River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1): 1-10.]

[9] 段峥嵘, 祖拜代·木依布拉, 夏建新, 等. 气候及土地类型变化条件下阿克苏绿洲耗水特征演变[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(6): 1203-1216. [Duan Zhengrong, Muyibula Zubaidai, Xia Jianxin, et al. Water consumption characteristics and evolution in Aksu oasis under climate variations and land-use changes[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(6): 1203-1216.]

[10] 王生霞, 叶柏生, 丁永建, 等. 绿洲耗水对阿克苏河流域地表径流的影响[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2): 203-210. [Wang Shengxia, Ye Baisheng, Ding Yongjian, et al. The effect of water consumption on surface runoff in oasis in the Aksu River Basin[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(2): 203-210.]

[11] 孙可可, 陈青青, 陈超群, 等. 基于水资源干旱指数的阿克苏绿洲干旱预警模式及其应用[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 84-89. [Sun Keke, Chen Qingqing, Chen Chaoqun, et al. A drought index-based model and its application to Aksu oasis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5): 84-89.]

[12] 王志成, 蒋军新, 方功焕, 等. 水资源约束下的阿克苏河流域适宜绿洲规模分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 986-992. [Wang Zhicheng, Jiang Junxin, Fang Gonghuan, et al. Analysis on the suitable scale of the Aksu oasis under the limit of water resources[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(4): 986-992.]

[13] 张学渊, 魏伟, 颉斌斌, 等. 西北干旱区生态承载力监测及安全格局构建[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2389-2402. [Zhang Xueyuan, Wei Wei, Jie Binbin, et al. Ecological carrying capacity monitoring and security pattern construction in arid areas of northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11): 2389-2402.]

[14] 尤朝辉. 基于系统动力学的淮南市生态承载力评价分析[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018. [You Chaohui. Evaluation and analysis of ecological carrying capacity of Huainan City based on system dynamics[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018.]

[15] 曹智, 闵庆文, 刘某承, 等. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 1-

11. [Cao Zhi, Min Qingwen, Liu Moucheng, et al. Ecosystem-service-based ecological carrying capacity: Concept, content, assessment model and application[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(1): 1-11.]
[16] 高吉喜, 陈圣宾. 依据生态承载力优化国土空间开发格局[J]. 环境保护, 2014, 42(24): 12-18. [Gao Jixi, Chen Shengbin. Optimize the spacial structure based on ecological capacity[J]. Environmental Protection, 2014, 42(24): 12-18.]
[17] 杨斌, 王占岐, 姚小薇, 等. 鄂西北山区土地利用的地形梯度效应与空间结构特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 313-321. [Yang Bin, Wang Zhanqi, Yao Xiaowei, et al. Terrain gradient effect and spatial structure characteristics of land use in mountain areas of northwestern Hubei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(2): 313-321.]
[18] 施国萍, 何永健, 张眉, 等. 基于GridMet模型的浙江省温湿指数空间分布及地形影响分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(12): 1923-1933. [Shi Guoping, He Yongjian, Zhang Mei, et al. Spatial distribution of THI in Zhejiang Province based on the GridMet model[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(12): 1923-1933.]
[19] 莫维燊. 基于土地资源承载力评价的国土空间优化研究——以广西宁明县为例[D]. 南宁: 南宁师范大学, 2019. [Mo Weishen. National spatial optimization based on land resource carrying capacity evaluation: A case study of Guangxi Ningming County[D]. Nanning: Nanning Normal University, 2019.]
[20] 廖炜, 李璐, 吴宜进, 等. 丹江口库区土地利用变化与生态环境脆弱性评价[J]. 自然资源学报, 2011 , 26(11): 1879-1889. [Liao Wei, Li Lu, Wu Yijin, et al. Land use change and eco-environmental vulnerability evaluation in the Danjiangkou reservoir erea[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(11): 1879-1889.]
[21] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京市生态安全格局及城市增长预景[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204. [Yu Kongjian, Wang Sisi, Li Dihua, et al. The function of ecological security patterns as an urban growth framework in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1189-1204.]
[22] 杨发鹏, 张雪唱, 李宗阳. 城市旅游"三生"竞争力空间分异——以西北五省为例[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 664-672. [Yang Fapeng, Zhang Xuechang, Li Zongyang. Spatial differentiation of the "production-life-ecology" competitiveness in urban tourism: A case study of five provinces in northwest China[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 664-672.]
[23] 邓华, 邵景安, 王金亮, 等. 多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟. 地理学报, 2016, 71(11): 1979-1997. [Deng Hua, Shao Jing'an, Wang Jinliang, et al. Land use driving forces and its future scenario simulation in the three gorges reservoir area using CLUE-S model[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(11): 1979-1997.]
[24] 张红旗, 许尔琪, 朱会义. 中国"三生用地"分类及其空间格局[J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1332-1338. [Zhang Hongqi, Xu Erqi, Zhu Huiyi. An ecological-living-industrial land classification system and its spatial distribution in China[J]. Resources Science, 2015, 37(7): 1332-1338.]

Ecological carrying capacity monitoring and security pattern construction in the Aksu River Basin, Xinjiang

YANG Zhenmin, LIU Xinping

(College of Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: As an inland river in the northwest arid zone, the Aksu River Basin hosts a fragile ecological environment. Studying its ecological security pattern is of great strategic significance for optimizing the national territory development and protection pattern, promoting the green transformation of production and lifestyle, and promoting the harmonious coexistence of man and nature. On the basis of the background characteristics of the study area, a spatial principal component analysis was undertaken to evaluate and monitor the temporal and spatial evolution of the ecological carrying capacity of the Aksu River Basin in Xinjiang, China in 1980, 2000, 2006, 2012, and 2018; the minimum cumulative resistance (MCR) mode was used to extract ecological corridors and ecological nodes in order to construct a comprehensive pattern of ecological security. The research results show that (1) the ecological carrying capacity of the river basin has significant spatial variations. The ecological carrying capacity of the Aksu River Basin is, for the most part, classified as being of medium carrying capacity, and the area with the highest ecological carrying capacity shows a trend of shifting from the central and eastern regions toward the west. The areas of strongest carrying capacity are predominantly located in the middle of the river basin and are distributed along the river in a zigzag pattern. The ecological carrying capacity of the upper and lower reaches of the river is relatively weak. The strong load-bearing areas are mainly distributed along the Toshigan River, Kumarak River, and the alluvial plains of the Aksu River; weak load-bearing areas are predominantly distributed on the northwestern edge of the Taklimakan Desert, the Tarim Basin, and the southern part of the Tianshan Mountains. (2) The ecological carrying capacity of the basin has shown an increase over time: In the past 40 years, the overall ecological carrying capacity of the Aksu River Basin has shown an upward trend, the acreage of strong carrying areas has been increasing, and the acreage of weak carrying areas has shown a fluctuating downward trend. These trends indicate that the basin environment has improved. The ecological carrying capacities of Akqi County, Wensu County, Wushi County, and Aksu City have showed an upward trend, whereas that of Alar City has showed a downward trend, and that of Awati County has remained roughly unchanged. (3) The ecological source area occupies a relatively small area, and the distribution is relatively concentrated. Through the assessment of the ecological carrying capacity of the Aksu River Basin, 23465.21 km^2 of ecological source area was finally extracted, accounting for approximately 35.61% of the study area. The ecological sources are concentrated in the central area of the basin, whereas they are less concentrated in the northern alpine areas, southwestern basins, and desert areas. (4) The ecological corridors are unevenly distributed, and the ecological nodes are relatively fragile. Using the MCR model and remote sensing images, the author divided the Aksu River Basin into 16 ecological security pattern zones, extracted 67 ecological corridors in the basin, and found that the ecological corridors are distributed around the river and predominantly concentrated in the central and eastern regions, with a small number present in the western region. The author also used commercial software to identify 71 ecological nodes, of which 20 are located between ecological sources, 16 are located in river flow areas, and 35 are located in mountain or piedmont areas. This work will make suggestions for optimizing the ecological spatial structure of the basin on the basis of the results of the evaluation of the ecological carrying capacity.

Key words: ecological carrying capacity; spatial and temporal evolution; ecological security pattern; optimization; Aksu River Basin